

Analisis Umur *Fatigue Rubber Spring* pada *Draft Gear* Lokomotif CC300

Muhammad Naufal Fariza, dan Julendra Bambang Ariatedja
Departemen Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: ariatedja@me.its.ac.id

Abstrak—Lokomotif CC300 adalah sarana perkeretaapian yang berfungsi sebagai penarik kereta atau gerbong yang dibuat oleh PT. Industri Kereta Api (Persero) di Madiun, Jawa Timur. Pada lokomotif tersebut, dalam sistem perangkainya, terdapat komponen *draft gear* sebagai penyerap energi dari pembebanan longitudinal, yang salah satu bagian pentingnya adalah *rubber spring*. Untuk perawatan *rubber spring* tersebut perlu diketahui umurnya. Dalam penelitian ini dilakukan analisis umur fatik terhadap *rubber spring* dengan simulasi FEM dengan ANSYS menggunakan *structural tools* dan *fatigue tools*. Nilai beban fatik didapatkan dari perhitungan dengan model beban siklik sinusoidal yang didapat dari pendekatan. Material *rubber spring* yang merupakan *natural rubber* memiliki karakter tegangan-regangan yang non-linear, sehingga digunakan model Neo-Hookean untuk memodelkannya. Dilakukan 6 simulasi yang masing-masing menghasilkan umur fatik akibat masing-masing variasi kondisi pembebanan yang berbeda, yaitu akselerasi, deselerasi, tanjakan, turunan, belokan, dan saat proses *coupling* atau menggandeng. Keenam hasil umur fatik tersebut kemudian diakumulasi menggunakan persamaan Miner's Rule. Didapatkan hasil umur fatik akibat beban kumulatif pada *rubber spring* adalah sebanyak 8381,29 siklus kumulatif, atau jika diaplikasikan kondisi tertentu sama dengan 45,8 tahun, atau 6.101.581,17km.

Kata Kunci—Beban Longitudinal Kereta Api, Hyperelastic, Metode Elemen Hingga, Miner's Rule, Umur Fatik.

I. PENDAHULUAN

KERETA api merupakan alat transportasi dengan tingkat efisiensi yang tinggi. Kereta api memiliki daya angkut baik untuk barang maupun penumpang yang relatif besar dengan konsumsi energi yang rendah [1]. Kereta api juga memiliki *rolling resistance* yang rendah dibandingkan dengan kendaraan darat yang lain walaupun dapat mencapai kecepatan rata-rata perjalanan yang tinggi [2]. Kereta api juga merupakan sektor industri yang penting di Indonesia. Dalam Rencana Induk Perkeretaapian Nasional 2030 disebutkan bahwa dalam 10 tahun ke depan perkembangan di bidang kereta api ditargetkan akan membutuhkan ribuan sarana perkeretaapian baru termasuk di dalamnya lokomotif.

PT INKA (Persero) sebagai perusahaan manufaktur sarana perkeretaapian di Indonesia tentunya memiliki peran penting dalam pemenuhan rencana tersebut. PT. INKA telah membuat lokomotif untuk pertama kali, yaitu lokomotif CC300. Lokomotif itu dirancang sebagai lokomotif multi-guna yang dapat digunakan untuk menarik kereta penumpang maupun gerbong barang, dilengkapi dengan penggerak berupa mesin diesel dengan tenaga 2200HP dan transmisi hidrolis. Lokomotif yang mampu mencapai kecepatan 120km/h ini telah diproduksi sebanyak 8 unit, dengan 5 unit dioperasikan oleh KEMENHUB RI, dan 3 unit diekspor ke Filipina.

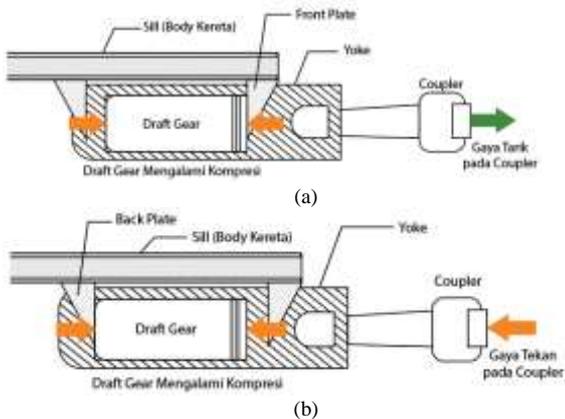
Sistem perangkai pada sarana kereta api berfungsi untuk menyambungkan sarana kereta api menjadi satu rangkaian, mentransmisikan gaya traktif dan pengereman dari lokomotif atau kereta berpengerak kepada kereta atau gerbong lain, serta menyerap energi sehingga dapat melindungi badan sarana kereta api agar tidak rusak ketika terkena beban yang besar akibat gaya traktif atau pengereman. Untuk fungsi penyambungan sarana perkeretaapian, terdapat *coupler* yang berfungsi untuk mengunci sambungan antar sarana perkeretaapian. Terdapat pula *draft gear* yang merupakan bagian dari sistem perangkai yang berfungsi untuk menyerap energi dari pembebanan tiba-tiba yang diterima sarana saat bergerak, akselerasi, deselerasi, atau berhenti untuk melindungi *body* kereta dari beban yang besar saat kondisi-kondisi tersebut. *Draft gear* terletak di dalam suatu struktur yang bernama *yoke*, di mana kepala *coupler* juga tersambung oleh *pin* dengan struktur tersebut. *Draft gear* akan bersinggungan dengan bagian *body* kereta yaitu *front* dan *back plate*. Gambar sistem perangkai dapat dilihat pada gambar 1 di bawah ini.

Cara kerja *draft gear* adalah dengan menyerap energi dari gaya tekan maupun tarik yang diterima oleh *coupler*. Seperti dapat dilihat pada gambar 2a, saat terjadi gaya tarik pada *coupler*, struktur *yoke* beserta *draft gear* akan ikut tertarik dan tertahan oleh bagian *front plate*, yang merupakan bagian dari *body* kereta, sehingga terjadi kompresi pada *draft gear*. Sedangkan seperti pada gambar 2b, saat terjadi gaya tekan pada *coupler*, struktur *yoke* dan *draft gear* akan tertekan dan tertahan oleh *back plate* sehingga terjadi kompresi pada *draft gear*. Terjadinya kompresi berulang-ulang dalam jumlah pengulangan yang sangat banyak, dapat menyebabkan kegagalan fatik pada *rubber spring*. Hal tersebut dapat berakibat mengurangi kenyamanan perjalanan hingga menyebabkan kecelakaan fatal.

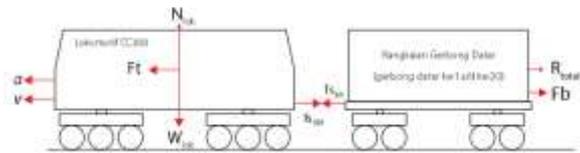
Untuk mencegah kegagalan fatik pada *rubber spring*, perlu dilakukan perawatan berupa penggantian atau peremajaan terhadap komponen *rubber spring* di saat sebelum terjadinya kegagalan. PT. INKA sebagai produsen lokomotif perlu memberikan rekomendasi waktu yang tepat untuk melakukan pengecekan pada komponen sebelum terjadinya kegagalan kepada operator kereta api sebagai pelanggannya. Untuk mengetahui waktu yang tepat untuk melakukan perawatan tersebut dapat dilakukan analisis menggunakan metode elemen hingga untuk mengetahui umur fatik atau umur di mana komponen tidak mengalami kerusakan akibat fatik atau kelelahan. Dengan memanfaatkan teknologi *software Ansys*, dapat dilakukan pengujian terhadap model 3D *rubber spring* dengan metode elemen hingga untuk mengetahui jumlah siklus yang akan menyebabkan kegagalan pada *rubber spring* tersebut.



Gambar 1. Sistem perangkai pada lokomotif CC300.



Gambar 2. Cara kerja *draft gear* (a) saat terjadi gaya tarik pada *coupler*, (b) saat terjadi gaya tekan pada *coupler*.



Gambar 3. FBD perhitungan pembebanan gaya kopler.

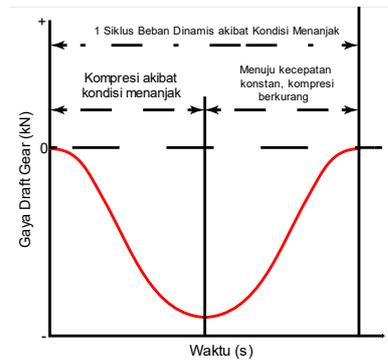
Material penyusun *rubber spring* adalah *natural rubber*. Material tersebut merupakan material yang bersifat elastomer, yaitu material yang akan kembali ke bentuk dan dimensi awal secara cepat setelah terjadi deformasi karena menerima tegangan maupun melepas tegangan [3]. Material tersebut memiliki sifat elastisitas yang disebut *hyperelastic*, yang berbeda dari material lain pada umumnya. Material tersebut memiliki karakter tegangan-regangan yang tidak linear, sehingga untuk memodelkannya di Ansys, perlu model tersendiri. Terdapat beberapa model yang dapat digunakan untuk mensimulasikan objek dengan material *hyperelastic*, di antaranya adalah Neo Hookean, Mooney-Rivlin, Ogden, dan berbagai macam lainnya. Permodelan tersebut diturunkan dari persamaan fungsi densitas energi regangan.

II. URAIAN PENELITIAN

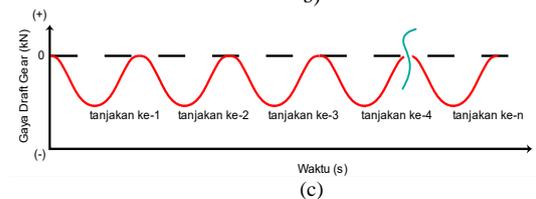
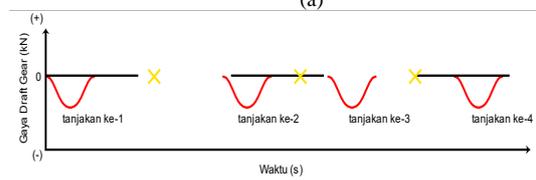
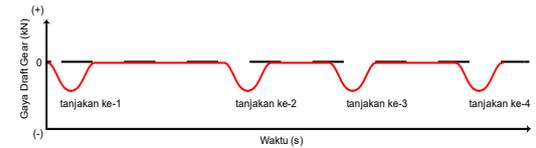
A. Gaya Longitudinal yang Bekerja pada Kereta Api

Terdapat beberapa gaya longitudinal yang bekerja pada kereta api, namun secara garis besar dibagi menjadi 2, yaitu *tractive effort* (gaya traktif) dan gaya resistansi. Gaya resistansi adalah gaya yang menghambat laju kereta api saat berjalan, memiliki besaran dengan arah berlawanan dengan arah gerak kereta api. Terdapat 3 jenis gaya resistansi, yaitu.

Gaya resistansi yang pertama adalah gaya *rolling resistance* (R_r) yang merupakan gaya hambat akibat perputaran roda kereta api yang bergesekan dengan rel. Pada umumnya, *rolling resistance* juga mencakup hambatan akibat gesekan pada *bearing*, gaya aerodinamis, dll. Berikut adalah



Gambar 4. Satu buah siklus kompresi pada draft gear akibat kondisi menanjak.



Gambar 5. Pembebanan tanjakan pada (a) kondisi sebenarnya, (b) asumsi tidak ada rentang waktu antar tanjakan, (c) model pembebanan yang digunakan dalam simulasi.

rolling resistance dari lokomotif CC300 yang disediakan oleh dokumen PT. INKA (Persero).

$$R_r = ((3,5 + s) \cdot m_{adh} \cdot 0,00981) + (0,0003 \cdot 10 \cdot \frac{v^2}{100}) + ((1,1 + s + (0,0002 \cdot v^2)) \cdot mw \cdot 0,00981) \quad (1)$$

di mana m_{adh} adalah masa adhesif lokomotif (ton), s adalah gradien tanjakan ($^\circ$), v adalah kecepatan kereta api (km/h), dan mw adalah massa total kereta api (ton).

Pada sumber lain menjelaskan persamaan *rolling resistance* yang hanya akibat gesekan pada roda sebagai berikut [4]:

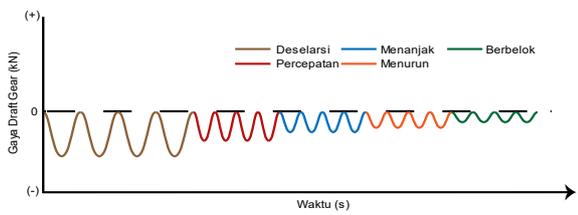
$$R_r = \frac{a}{r} N \quad (2)$$

di mana a adalah koefisien resistansi (mm), r adalah radius roda (mm), dan N adalah gaya normal kereta (kN).

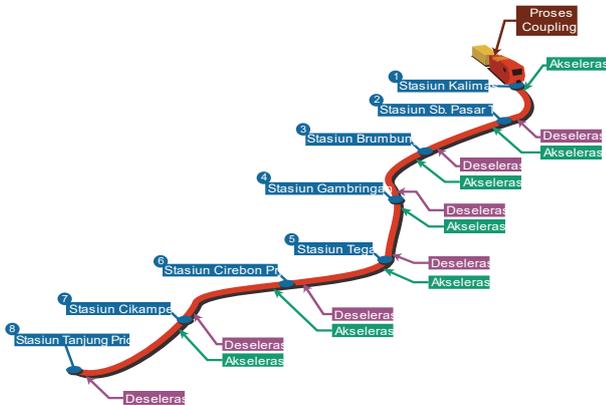
Curve Resistance (R_c) adalah gaya resistansi akibat adanya kelengkungan pada jalur kereta api yang dilewati [5]. Dengan gaya normal kereta N (kN), dan radius kelengkungan r (m), maka *curve resistance* secara teoritis dapat dituliskan sebagai berikut:

$$R_c = \frac{6116}{r} N \quad (3)$$

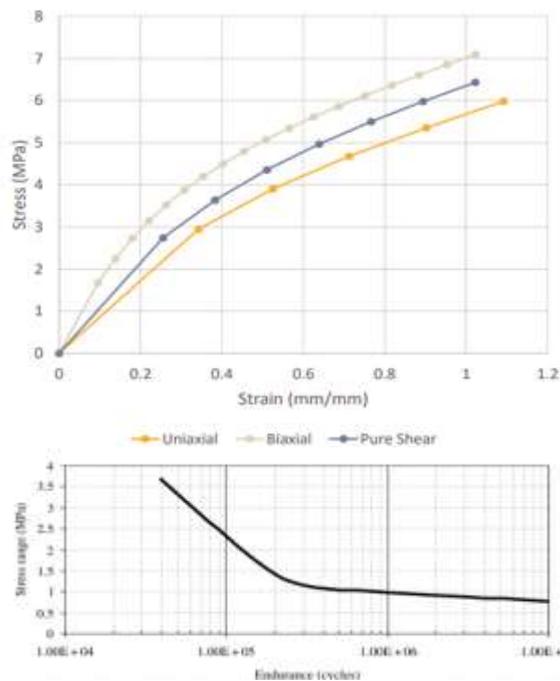
Gradient Resistance (R_g) adalah gaya resistansi akibat adanya gradien (slope) baik tanjakan maupun turunan pada jalur kereta api yang dilewati, dengan massa kereta M (ton),



Gambar 6. Ilustrasi grafik pembebanan fatik sinusoidal.



Gambar 7. Perjalanan dari Kalimas hingga Tanjung Priok sebagai 1 siklus kumulatif.



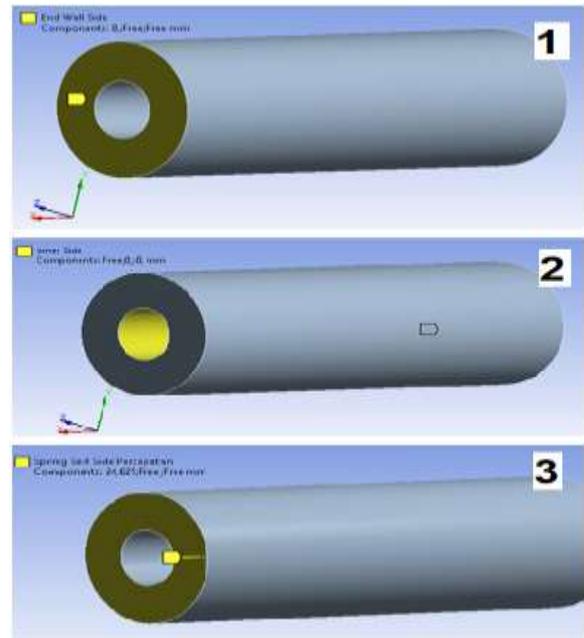
Gambar 8. Data pengujian uniaxial, biaksial, pure shear, serta s-n curve dari natural rubber.

percepatan gravitasi g (m/s^2), dan gradien jalur α ($^\circ$), maka *gradient resistance* secara teoritis dapat dituliskan sebagai berikut:

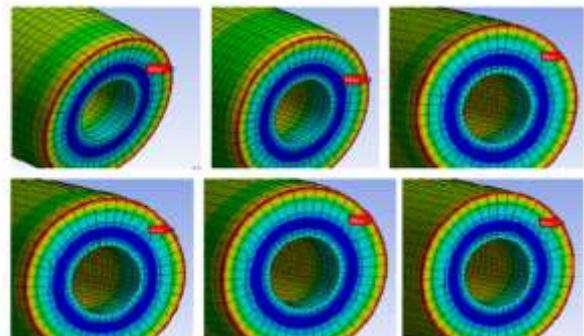
$$R_g = M \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (4)$$

Sedangkan, gaya traktif merupakan gaya yang dikeluarkan oleh sistem propulsi kereta api dan disalurkan ke roda untuk dapat membuat kereta api bergerak. Gaya traktif harus selalu lebih besar dari total gaya resistansi agar kereta api dapat melaju, sehingga secara teoritis, gaya traktif (F_t) dapat dituliskan dengan persamaan hukum newton II sebagai berikut:

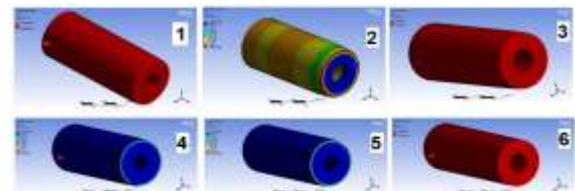
$$F_t = m \cdot w \cdot a + (R_r + R_c + R_g) \quad (5)$$



Gambar 9. Boundary condition dalam simulasi.



Gambar 10. Titik terjadinya tegangan maksimal pada rubber spring.

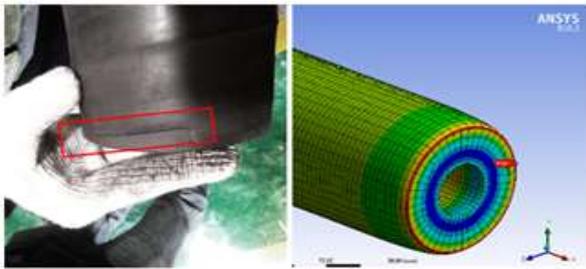


Gambar 11. Distribusi siklus umur fatik dari simulasi.

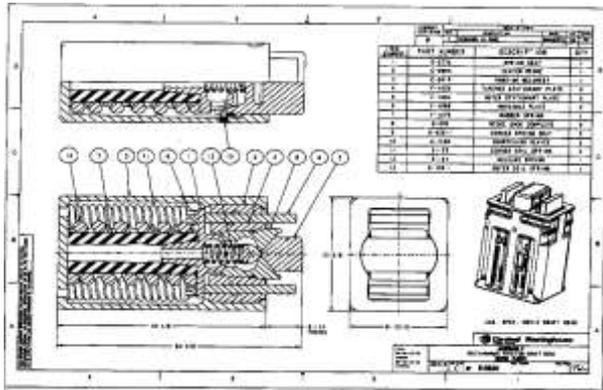
B. Perhitungan Pembebanan

Perhitungan pembebanan dilakukan untuk menentukan nilai pembebanan yang akan digunakan dalam simulasi. Perhitungan pembebanan dilakukan untuk 6 kondisi, yaitu saat percepatan (berangkat dari stasiun), perlambatan (berhenti di stasiun), melalui tanjakan, melalui turunan, melalui belokan, dan saat proses penggantungan dengan sarana kereta api lain (*coupling*). Rangkaian kereta api yang digunakan dalam kereta api ini adalah 1 buah lokomotif CC300 dengan 20 unit gerbong datar yang mengangkut peti kemas ISO 40ft. Detail spesifikasi yang digunakan dalam simulasi dapat dilihat pada tabel 1.

Setelah dilakukan perhitungan pembebanan, hasil yang diharapkan adalah besar gaya tarik atau tekan yang terjadi pada *coupler* lokomotif, maka perhitungan dilakukan sesuai FBD seperti pada gambar 3. Pada FBD, R_{total} merupakan gaya resistansi total yang mencakup R_r , R_c , dan R_g dari lokomotif dan 20 gerbong, sedangkan F_b adalah nilai *braking effort* yang didapat dari spesifikasi lokomotif dan gerbong.



Gambar 12. Titik terjadinya kerusakan komponen dibandingkan dengan titik tegangan maksimal pada simulasi.



Gambar 13. Gambar teknik rubber draft gear westinghouse r-500 yang digunakan pada lokomotif CC300.

Kemudian dari nilai besar gaya tersebut bisa didapatkan berapa besar perpindahan yang terjadi pada *rubber spring* dari grafik F-D (*Force-Displacement*) *draft gear*. Khusus untuk kondisi *coupling*, penentuan perpindahan dilakukan dengan metode yang berbeda, yaitu dengan melihat besar energi kinetik yang diserap oleh *rubber spring*. Hasil gaya kopler dan perpindahan pada *rubber spring* dapat dilihat pada tabel 2.

Pada tabel 2 tersebut telah dihitung juga beban yang diterima *coupler* pada saat kondisi kereta api berjalan dengan kecepatan konstan dan didapatkan beban pada kondisi tersebut adalah 0kN.

C. Penentuan Beban Fatik

Pembebanan yang telah dihitung tidak dapat secara langsung digunakan sebagai *input* untuk simulasi dalam rangka mengetahui umur fatik *rubber spring*, oleh karena itu perlu dibuat asumsi dan pendekatan terlebih dahulu agar beban tersebut dapat menjadi jenis beban yang cocok untuk analisis fatik, yaitu yang bersifat sinusoidal. Pada model pembebanan sinusoidal terdapat nilai tegangan saat beban maksimal dan saat beban minimum, oleh karena itu perlu ditentukan dahulu keduanya. Dalam penelitian ini, beban maksimum yang mengenai *rubber spring* dianggap memiliki nilai sebesar gaya kopler. Sedangkan, untuk nilai minimumnya dianggap merupakan nilai beban dari kondisi sebelumnya, yaitu 0kN, karena sebelum terjadinya salah satu kondisi tersebut kereta api diasumsikan berjalan dengan kecepatan konstan, ataupun berhenti, di mana beban yang diterima *coupler* adalah 0kN.

Untuk menjelaskan pendekatan yang digunakan dalam penelitian ini, diambil kondisi pembebanan tanjakan. Sebelum melewati tanjakan, kereta api dianggap berjalan dengan kecepatan konstan, sehingga beban pada *coupler* adalah 0 kN. Kemudian saat kereta api melewati tanjakan, terjadi perubahan *rolling resistance* yang menjadi lebih besar

Tabel 1.
Spesifikasi yang digunakan dalam perhitungan pembebanan

Spesifikasi	Lokomotif	Gerbong Datar
Berat Maksimum	84 Ton	45,48 Ton
<i>Tractive Effort</i> Maksimum	270kN	-
<i>Braking Effort</i> pada Full Service (<i>Fb</i>)	72kN	44kN
Diameter Roda	430mm	430mm
Kecepatan Operasi	60km/j	(diasumsikan)

Tabel 2.
Hasil perhitungan pembebanan

Kondisi	Gaya Kopler (kN)	Perpindahan pada <i>Rubber Spring</i> (mm)
Percepatan	-476,93	24,625
Perlambatan	1801,18	52,334
Tanjakan	146,40	26,124
Turunan	-265,49	26,124
Berbelok	287,46	27,286
<i>Coupling</i>	-	0,476
Kecepatan Konstan	0	0

Tabel 3.
Hasil tegangan ekuivalen dari simulasi

No.	Kondisi	Tegangan Eq. Maksimal (MPa)
1.	Percepatan	1,395
2.	Perlambatan	3,180
3.	Tanjakan	1,022
4.	Turunan	1,485
5.	Berbelok	1,555
6.	<i>Coupling</i>	0,026

Tabel 4.
Hasil umur (siklus) fatik dari simulasi

No.	Kondisi	Siklus Umur Fatik
1.	Percepatan	9.794.900
2.	Perlambatan	120.210
3.	Tanjakan	9.794.900
4.	Turunan	5.615.000
5.	Berbelok	3.160.300
6.	<i>Coupling</i>	9.794.900

sehingga menyebabkan terjadinya pembebanan pada *coupler* hingga mencapai nilai maksimal. Namun, perlahan-lahan *tractive effort* akan bertambah untuk dapat melawan *rolling resistance* tersebut, sehingga gaya *coupler* kembali menjadi 0kN. Akhirnya didapatkan 1 siklus sinusoidal dari kejadian tersebut seperti pada gambar 4.

Kondisi tanjakan tersebut akan terjadi secara berulang-ulang tergantung ada berapa tanjakan yang dilewati kereta api di lintas. Namun, dari 1 tanjakan ke tanjakan yang lain akan memiliki rentang waktu, grafiknya seperti yang dapat dilihat pada gambar 5a. Untuk dapat memunculkan grafik pembebanan sinusoidal yang ideal, maka rentang waktu tersebut dianggap tidak ada (seperti pada gambar 5b), sehingga grafik pembebanan akibat *n* kali tanjakan adalah seperti yang dapat dilihat pada gambar 5c. Model pembebanan sinusoidal tersebut yang akan digunakan untuk simulasi fatik pada penelitian ini.

Kemudian untuk kondisi yang lain, akan dilakukan pendekatan yang sama pula. Sehingga akan didapatkan grafik sinusoidal pembebanan seperti pada gambar 6. Selanjutnya akan digunakan persamaan *damage* kumulatif Miner's Rule untuk menentukan umur fatik kumulatif akibat 6 jenis pembebanan tersebut dalam sebuah siklus kumulatif tertentu.

D. Penentuan Siklus Kumulatif

Penentuan siklus kumulatif perlu dilakukan untuk menentukan berapa kali masing-masing kondisi akan terjadi

berdasarkan kondisi kenyataan. Dalam penelitian ini siklus kumulatif dianggap merupakan perjalanan lokomotif CC300 ketika berdiras sebagai KA Limaspriuk dari Stasiun Kalimas di Surabaya hingga Stasiun Tanjung Priok di Jakarta. Seperti yang dapat dilihat pada ilustrasi di gambar 7, kereta api akan berhenti di 6 buah stasiun di antara stasiun awal hingga stasiun akhir, sehingga diketahui terjadi 7 kali akselerasi dan 7 kali deselerasi. Kemudian dilakukan analisis melalui *software* Google Earth dengan proses *tracking* jalur rel untuk menentukan estimasi jumlah tanjakan dan belokan yang dilewati kereta api dalam jalur tersebut. Didapatkan estimasi jumlah tanjakan, turunan, dan belokan dari perjalanan tersebut berturut-turut adalah 112, 112, dan 130. Sedangkan untuk proses *coupling* hanya terjadi 1 kali, yaitu di stasiun keberangkatan awal.

Selanjutnya, jika umur fatik untuk masing-masing kondisi sudah didapatkan dari simulasi, maka akan dihitung umur siklus kumulatif menggunakan persamaan Miner's Rule sebagai berikut:

$$D = \sum \frac{n_i}{N_i} = N \left[\frac{n_1}{N_1} + \frac{n_2}{N_2} + \frac{n_3}{N_3} + \frac{n_4}{N_4} + \frac{n_5}{N_5} + \frac{n_6}{N_6} \right] \quad (6)$$

Dengan n_i merupakan jumlah siklus aktual yang terjadi selama perjalanan, dan N_i merupakan siklus umur fatik yang didapat dari hasil simulasi untuk masing-masing kondisi. N adalah siklus umur fatik kumulatif yang akan ditentukan dengan menganggap nilai *damage* (D) adalah 1.

E. Permodelan Material

Model *rubber spring* dibuat melalui *software* Solidworks dengan mengikuti acuan gambar teknik dari PT. INKA. Material model yang merupakan material *hyperelastic* mengharuskan untuk digunakannya model material *hyperelastic* dalam simulasi. Model material yang digunakan pada penelitian ini adalah Neo-Hookean, karena merupakan model yang paling sederhana dibandingkan yang lain sehingga proses komputasi simulasi bisa berjalan lebih cepat. Perpindahan yang terjadi pada *rubber spring* juga masih berada dalam rentang kemampuan permodelan deformasinya, yaitu di bawah 30% [6].

Selanjutnya perlu memasukkan data pengujian uniaksial, biaksial, dan *pure shear* ke dalam *engineering data* pada Ansys seperti pada Gambar 8. Idealnya, untuk melakukan simulasi seperti ini, diperlukan data pengujian dari komponen yang asli, sehingga hasil yang didapatkan bisa lebih valid. Karena keterbatasan waktu dan ketersediaan komponen sehingga tidak dapat dilakukan pengujian, maka akan digunakan data pengujian material *natural rubber* yang disediakan oleh Ansys dalam *website*-nya. Data pengujian tersebut kemudian dilakukan *curve-fitting* menggunakan persamaan model Neo-Hookean, sehingga simulasi *hyperelastic* dapat dijalankan.

Untuk dapat memprediksi umur fatik akibat pembebanan pada *rubber spring*, perlu dimasukkan juga S-N Curve yang diperlukan oleh *fatigue tools*. Karena keterbatasan yang sama dengan kasus di paragraf sebelumnya, maka pengujian tidak dapat dilakukan. Sehingga akan digunakan S-N Curve dari material elastomer yang merupakan hasil pengujian oleh R. R. K. Luo pada tahun 2003 [7].

F. Pengaturan Simulasi

Sebelum dilakukan simulasi, perlu dilakukan beberapa

pengaturan terlebih dahulu. Proses *meshing* atau diskretisasi yang merupakan proses untuk membagi model komponen menjadi sejumlah bagian kecil yang disebut dengan elemen *mesh*. Ukuran elemen *mesh* pada simulasi ini ditentukan dengan melalui uji konvergensi. Pengujian ini dilakukan untuk menentukan nilai elemen *mesh* maksimal yang menunjukkan hasil yang sudah stabil. Dari uji tersebut didapatkan ukuran *mesh* sebesar 8mm.

Selanjutnya, ditentukan *boundary condition* dari komponen untuk disimulasikan. Pada salah satu sisi ujung komponen, diberikan kondisi *fixed support* yang menggambarkan kondisi salah satu ujung *rubber spring* menempel pada dinding *yoke* (ditunjukkan pada gambar 9 dengan penunjuk angka 1). Salah satu ujung yang lain mendapat kondisi untuk terkena perpindahan sebesar nilai yang telah ditentukan untuk masing-masing kondisi pada sumbu X, dan perpindahan bebas untuk sumbu Y dan Z (ditunjukkan pada gambar 9 dengan penunjuk angka 3). Pada sisi dalam ditetapkan kondisi perpindahan bebas untuk sumbu X, namun tidak diperbolehkan terjadi perpindahan pada sumbu Y, dan Z (ditunjukkan pada gambar 9 dengan penunjuk angka 2). Hal itu menyimulasikan bagian dalam *rubber spring* yang ditahan oleh sebuah komponen lain dari *draft gear* yang bernama *spring seat*.

Untuk *fatigue tools*, digunakan input berupa hasil tegangan ekuivalen *von-mises*. Beban yang digunakan adalah *zero-based*, karena beban fatik yang telah ditentukan bersifat sinusoidal yang bersifat *zero-based*. Diperlukan pula *mean stress theory (MST)* dalam simulasi ini, sehingga dipilih MST Goodman. Kemudian hasil yang diharapkan adalah umur komponen dalam satuan siklus.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Hasil Simulasi

Dari simulasi *static structural* yang telah dilakukan, didapatkan hasil tegangan ekuivalen yang berbeda-beda untuk masing-masing kondisi. Hasil nilai tegangan untuk masing-masing kondisi tersebut dapat dilihat pada tabel 3, sedangkan untuk distribusi tegangan beserta titik tegangan maksimalnya dapat dilihat pada gambar 10.

Jika dilihat dari hasil simulasi, tegangan yang paling besar terjadi pada saat kondisi perlambatan. Pada saat kondisi itu pula, pembebanan yang terjadi memang yang paling besar dibandingkan dengan kondisi yang lain, sehingga sudah seharusnya tegangan yang terjadi pada *rubber spring* juga yang paling besar.

Dari distribusi tegangan, terlihat titik terjadinya tegangan maksimal berada pada letak yang sama, yaitu pada ujung di mana *rubber spring bonded* dengan dinding bagian dalam *yoke*. Hal itu terjadi akibat terjadinya konsentrasi tegangan pada perubahan luasan yang terjadi secara tiba-tiba.

Selanjutnya, hasil umur fatik dari masing-masing kondisi dapat dilihat pada tabel 4, dan distribusi umur fatiknya dapat dilihat pada gambar 11.

Dari hasil simulasi, didapatkan umur fatik yang paling sedikit adalah pada kondisi perlambatan, yaitu sebesar 120.210 siklus. Pada kondisi percepatan, tanjakan, dan *coupling* dihasilkan nilai umur fatik yang *infinite* yang ditunjukkan oleh distribusinya yang hanya warna merah, serta nilainya yang mencapai 9.10^6 .

B. Hasil Umur Fatik Kumulatif

Hasil umur fatik kumulatif didapatkan dari perhitungan dengan menggunakan persamaan Miner's Rule atau persamaan (6). Didapatkan hasil umur fatik kumulatif sebanyak 8381,29 siklus. Untuk dapat menerka seberapa besar siklus tersebut, maka hasil umur dalam bentuk siklus tersebut akan diubah menjadi dalam bentuk tahun dan km untuk dapat mengetahui seberapa lama dan jauh *rubber spring* akan bertahan ketika digunakan untuk operasional kereta api.

Untuk menghitung umur dalam bentuk tahun, akan dianggap lokomotif CC300 berdinis sebagai penarik KA Limaspriuk sebanyak sekali setiap 2 hari dengan beban 20 gerbong GD yang masing-masing mengangkut peti kemas ISO 40ft. Beban seperti itu termasuk beban yang cukup ekstrem dibandingkan jika dibandingkan beban saat menarik kereta penumpang. Dengan asumsi tersebut, maka didapatkan umur fatik *rubber spring* adalah sebanyak 45,8 tahun.

Untuk menentukan umur fatik dalam bentuk km, maka akan digunakan asumsi yang sama seperti pada paragraf di atas. Jarak antara stasiun Tanjung Priuk dan Kalimas kurang lebih adalah 728km, sehingga umur fatik dalam jarak adalah sebanyak 6.101.581,2 km (6×10^6 km).

C. Perawatan Rubber Spring oleh Operator Kereta Api

Data mengenai perawatan *rubber spring* pada kereta api yang dioperasikan oleh PT. Kereta Api Indonesia (Persero) telah dicoba untuk dicari melalui Depo Kereta Stasiun Madiun. Tujuan pencarian data tersebut adalah untuk mengetahui bagaimana kerusakan yang terjadi dan periode perawatan komponen *rubber spring draft gear*. PT. KAI sebagai operator juga melakukan perawatan terhadap sarana perkeretaapiannya. Perawatan yang dilakukan terhadap sarana perkeretaapiannya terdapat berbagai macam. Untuk perawatan yang terjadwal antara lain yaitu Semiperawatan Akhir (SPA) dan Perawatan Akhir (PA), yang dilaksanakan di Balai Yasa, dan perawatan harian yang dilaksanakan di depo kereta api. Untuk gambar teknik *rubber draft gear westinghouse r-500* yang digunakan pada lokomotif CC300 dapat dilihat pada Gambar 13.

Balai yasa merupakan tempat yang digunakan untuk perawatan besar sarana perkeretaapiannya yang dimiliki oleh operator. Terdapat 6 buah balai yasa kereta api di Pulau Jawa. Untuk lokomotif, perawatan dilakukan di Balai Yasa Yogyakarta. Sedangkan, depo kereta api merupakan tempat untuk menyimpan dan tempat untuk melakukan perawatan rutin kereta api serta merupakan tempat untuk melakukan perbaikan ringan, yang lokasinya tersebar di sepanjang lintas kereta api, salah satunya adalah di Stasiun Madiun.

Dari hasil wawancara dengan kepala Dipo Kereta Stasiun Madiun, diketahui bahwa perawatan pada *rubber spring* dilakukan hanya pada saat Perawatan Akhir (PA) dengan periode 4 tahun sekali. Didapatkan pula bahwa selama dioperasikannya kereta api, belum pernah diketahui adanya kerusakan yang terjadi pada komponen *rubber spring*. Sedangkan, beberapa lokomotif, seperti lokomotif CC201 (mulai digunakan sejak tahun 1977) yang masih aktif dioperasikan oleh PT. KAI, telah berumur lebih dari 40 tahun.

Dengan melihat fakta bahwa lokomotif yang masih aktif dapat mencapai umur lebih dari 40 tahun, jika dibandingkan dengan hasil perhitungan umur fatik *rubber spring* yang

sebanyak 45,8 tahun, maka hasil tersebut masih dapat terbilang masuk akal. Ada kemungkinan bahwa beban kerja lokomotif di PT. KAI tidak se-ekstrem pembebanan pada penelitian ini, karena tidak setiap hari lokomotif digunakan untuk menghela kereta barang, sehingga dapat menyebabkan umur fatik dari *rubber spring* lokomotif sebenarnya lebih lama dari umur hasil perhitungan..

D. Pengujian Draft Gear oleh PT. INKA

PT. INKA telah melakukan pengujian terhadap komponen *rubber spring*. Pengujian tersebut dilakukan pada *draft gear* prototipe buatan dalam negeri untuk mengetahui apakah kekuatannya sudah memenuhi standar yang telah ditentukan untuk *draft gear*. Ternyata saat dilakukan pengujian dengan dilakukan kompresi, komponen *rubber spring* diketahui mengalami kerusakan berupa retakan. Posisi retakan terdapat pada sisi luar di dekat salah satu ujungnya seperti yang terlihat pada Gambar 12.

Jika dilihat hasil simulasi dalam penelitian ini, dapat diketahui bahwa ujung tersebut mengalami nilai tegangan yang paling besar saat komponen dikenai pembebanan. Sehingga berdasarkan hasil penelitian, memang sudah seharusnya titik awal terjadinya kerusakan adalah di titik tersebut, di mana nilai tegangan yang terjadi sangat besar dibandingkan pada titik yang lain.

E. Rekomendasi yang Diberikan

Karena banyaknya keterbatasan dalam pengerjaannya, penelitian ini diselesaikan dengan berbagai macam pendekatan dan asumsi, mulai dari model pembebanan, hingga karakter material. Pengaruh temperatur serta degradasi pada material karet juga masih diabaikan dalam penelitian ini akibat keterbatasan data. Data karakter tegangan-regangan, serta S-N Curve pun juga diambil dari hasil pengujian material karet yang lain. Terlepas dari banyaknya pendekatan, prosedur penelitian ilmiah dalam penelitian ini sudah diterapkan dan diikuti dengan sebaik mungkin dalam pengerjaannya. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan serta pemicu untuk penelitian-penelitian selanjutnya dalam bidang *rubber spring, draft gear*, simulasi material karet, ataupun simulasi umur fatik.

Dalam penelitian ini didapatkan umur *rubber spring* akibat beban fatik adalah sepanjang 45,8 tahun, namun hasil tersebut kurang bisa menjadi rekomendasi waktu yang tepat untuk perawatan komponen *rubber spring* itu sendiri. Karena bisa saja *rubber spring* mengalami kegagalan sebelum umur fatik tersebut tercapai akibat sebab yang lainnya, misalnya saja akibat beban impact, degradasi material, ataupun perubahan sifat material akibat suhu kerja di dalam *draft gear*. Sehingga, rekomendasi yang dapat diberikan adalah agar penelitian seperti ini dapat dikembangkan kembali. Selanjutnya diperlukan penelitian yang meninjau jenis pembebanan lain yang terjadi pada komponen *rubber spring*, diperlukan juga penelitian dengan prosedur yang lebih lengkap seperti pengujian material untuk mendapatkan karakter tegangan-regangannya serta S-N Curve-nya, dan pengambilan data pembebanan yang terjadi secara aktual pada *draft-gear*.

IV. KESIMPULAN/RINGKASAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, maka dapat ditarik kesimpulan: (1) Umur fatik *rubber spring* pada *draft*

gear CC300 adalah sebesar 8381,29 siklus kumulatif, atau 45,8 tahun, atau 6.101.581,17km. Dengan siklus kumulatif berupa perjalanan CC300 sebagai penarik KA Limaspriuk dari stasiun Kalimas (Surabaya) hingga Tanjung Priok (Jakarta) sejauh 728km dengan beban 20 gerbong GD bermuatan peti kemas 40ft, dan siklus tersebut dilakukan 1 kali tiap 2 hari sepanjang tahun. (2) Masih perlu dilakukan pengembangan dari penelitian ini karena masih banyak digunakan pendekatan, asumsi, dan keterbatasan sehingga beberapa hal kurang sesuai dengan keadaan sebenarnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam pengerjaan penelitian ini, telah banyak pihak yang membantu penulis. Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada PT. INKA (Persero) yang telah memberikan data pendukung utama serta banyak pengetahuan mengenai *rubber spring* pada *draft gear* yang diteliti penulis. Penulis juga berterima kasih kepada PT. KAI (Persero) yang

memberikan pengetahuan mengenai perawatan kereta api, khususnya komponen *rubber spring draft gear*.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Perez-Martinez, Pedro & Sorba, Iván. (2010). Refereed papers: energy consumption of passenger land transport modes. *Energy & Environment*. 21. 577-600. 10.1260/0958-305X.21.6.577.
- [2] Hay. (1965). *Introduction to Transportation Engineering*. Tokyo: Wiley-Topan.
- [3] Asare, S. (2013). *Failure of Rubber Components under Fatigue*. London. Queen Mary University of London.
- [4] Hibbeler. (2010). *Statics and Dynamics*. New Jersey: Pearson Education, Inc.
- [5] Iwnicki, S. (2006). *Handbook of Railway Vehicle Dynamics*. New York: Taylor & Francis.
- [6] Grama R.B. (2020). *ANSYS Mechanical-A Powerful Nonlinear Simulation Tool*. Canonsburg, PA: ANSYS, Inc.
- [7] R K Luo, P W Cook, W X Wu, and W J Mortel. (2003). *Fatigue Design of Rubber Springs Used in Rail Vehicle Suspensions*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F Journal of Rail and Rapid Transit*, 237-240. doi: 10.1243/095440903769012920.